اثر فشار سیال بر جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی*

عماد رحیمی[۱] حسن مسلمی نائینی[۲] حامد دیلمی عضدی[۳] سیامک مزدک[٤] محمد مهدی کسایی[۵]

چکیده *استفاده از لوح‌های ترکیبی در تولید، مزایای فراوانی را از قبیل کاهش وزن و هزینه‌ی تولید محصولات در پی دارد. اما به‌کارگیری این لوح‌ها در صنعت، نیازمند استفاده از روش‌هایی برای چیره شدن بر مشکل کاهش شکل‌پذیری این لوح‌ها نسبت به مواد پایه‌ی آن‌هاست. یکی از این روش‌ها به‌کارگیری فشار سیال در شکل‌دهی ورقی است. در این تحقیق، فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی به وسیله‌ی روش اجزای محدود و صحت‌سنجی تجربی مطالعه شده است. در نهایت اثر استفاده از فشار سیال بر میزان جابه‌جایی خط‌جوش و توزیع ضخامت لوح‌هایی از جنس فولاد کربنی St12 با نسبت‌های ضخامت متفاوت بررسی شده است. نتایج عددی به‌دست آمده با نتایج تجربی، مطابقت نسبتاً خوبی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که یک مقدار بهینه برای فشار نهایی سیال برای دست‌یابی به کمترین بیشینه‌ی نازک‌شدگی وجود دارد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که با استفاده از فشار سیال در این فرآیند، امکان دست‌یابی به نسبت‌های کشش بالاتر و هم‌چنین امکان کاهش جابه‌جایی خط جوش نسبت به فرآیند کشش عمیق متداول وجود دارد.*

واژه‌های کلیدی لوح ترکیبی (TWB)، کشش عمیق هیدرومکانیکی، فشار سیال، جابه‌جایی خط جوش، توزیع ضخامت

Effect of Fluid Pressure on Weld-Line Movement and Thickness Distribution in Hydro-Mechanical Deep Drawing of Tailor-Welded Blanks (TWBs)

E. Rahimi H. Moslemi Naeini H. Deylami Azodi S. Mazdak M.M. Kasaei

Abstract *Use of Tailor-Welded Blanks (TWBs) in production has significant advantages such as weight and cost reduction. However, their application requires processes that increase their poor formability in comparison to base materials. One of these procedures is the use of fluid pressure in sheet metal forming. In this paper hydro-mechanical deep drawing process of tailor-welded low carbon steel (St12) blanks with different thicknesses is studied using FEM and verified experimentally, and effect of fluid pressure on weld-line movement and thickness distribution is investigated. Results of FEM are in good agreement with experiments. Results show that there is an optimum value of final pressure in which the least maximum thinning occurs. Furthermore, using fluid pressure we can obtain higher drawing ratios and also reduce the weld-line movement compared to conventional deep drawing.*

Key Words Tailor-Welded Blank (TWB), Hydro-Mechanical Deep Drawing, Fluid Pressure, Weld-Line Movement, Thickness Distribution

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/٦/۲۰، نسخه پذیرش آن در تاریخ ۹۰/۹/۲۰ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۰/۱۱/۷ به دفتر نشریه رسیده‌است.

(۱) کارشناس ارشد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۳) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشکده‌ی فنی و مهندسی اراک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(٤) استادیار، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش

(۵) دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

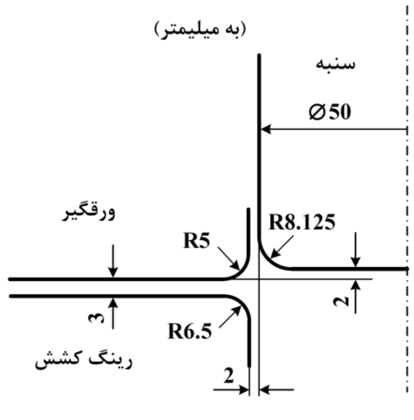
استفاده از لوح‌های ترکیبی (TWB) در تولید به منظور کاهش وزن محصول، کاهش دورریز و هزینه‌های مواد، افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی و هم‌چنین فراهم شدن امکان استفاده از مزایای فرآیندهای جوشکاری پیوسته، کاربرد روزافزونی یافته است. مسأله‌ی مهم در شکل‌دهی این لوح‌ها، کاهش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی نسبت به ورق‌های پایه است. کاهش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی نسبت به لوح‌های پایه‌ی آن‌ها، به خواص ناحیه‌ی جوش و ناحیه‌ی متأثر از حرارت و تغییر شکل ناهمگون بخش‌های مختلف لوح مربوط می‌شود [1]. شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی به علت شکل‌پذیری کم این لوح‌ها، دشوار است.

تحقیقات متعددی در زمینه‌ی به‌کارگیری روش‌هایی به منظور افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی انجام شده است. در تحقیق احمداقلو و همکاران [2] برای افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی و با هدف اعمال فشار متفاوت بر دو نیمه‌ی لوح، یک روش کنترل فشار برای ورق‌گیر پیشنهاد شده است. در این روش از یک سیستم سیلندر نیتروژنی که شامل ٦ سیلندر نیتروژن و دو تانک می‌باشد، استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که چرخش خط جوش در حین شکل‌دهی با استفاده از نیروی ورق‌گیر متفاوت، قابل کنترل است. با کنترل موقعیت خط جوش، امکان کاهش سطح کرنش روی نیمه‌ی لوح که دارای ضخامت یا استحکام کمتر می‌باشد، وجود دارد. در تحقیقی که توسط کینسی و همکاران [3] انجام شد، از یک سیستم مهارکننده‌ی هیدرولیکی برای کنترل حرکت خط جوش لوح‌های ترکیبی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های این تحقیق، کاهش بیشینه‌ی کرنش‌ها در راستای خط جوش تا یک- پنجم را گزارش می‌کند. جیانگ و همکاران [4] در تحقیقی روش شکل‌دهی چند مرحله‌ای را به عنوان یک راهکار برای افزایش خاصیت شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی پیشنهاد کرده‌اند. در نتایج این تحقیق که بر روی یک قطعه‌ی صنعتی انجام شده است، مشاهده می‌شود که در این فرآیند، تغییر مسیر کرنش برای کاهش پیک‌های کرنش مفید خواهد بود. در تحقیقی که توسط چنا و همکاران [5] انجام شده، تأثیر استفاده از ورق‌گیر پله‌دار و پین‌های نگه‌دارنده‌ی خط جوش بر شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی کشش یک جعبه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق گزارش می‌شود که استفاده از ورق‌گیر پله‌دار به کاهش پدیده‌ی چین‌خوردگی کمک کرده است. هم‌چنین استفاده‌ی هم‌زمان از ورق‌گیر پله‌دار و پین‌های نگه‌دارنده بهترین اثر را در بهبود شکل‌پذیری محصول داشته است. پادمانابهان و همکاران [6] با استفاده از شبیه‌سازی‌های المان محدود، اثر استفاده از ورق‌گیر چندتکه را در شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی آلومینیوم- فولاد، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که ورق‌گیر چندتکه امکان اعمال مناسب نیروهای ورق‌گیری مختلف را بر دو بخش لوح‌ها فراهم کرده است؛ که به افزایش قابلیت شکل‌پذیری این لوح‌های ترکیبی می‌انجامد.

ازآن‌جایی که فرآیند شکل‌دهی هیدرومکانیکی به عنوان یک فرآیند تولیدی با کاربرد روزافزون برای دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر، امکان تولید قطعات پیچیده‌تر و هم‌چنین توزیع یکنواخت‌تر ضخامت نسبت به فرآیند کشش عمیق متداول مطرح است، استفاده از این فرآیند به منظور افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی مورد توجه قرار می‌گیرد. تحقیقات اندکی در زمینه‌ی استفاده از روش‌های هیدروفرمینگ در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی گزارش شده است. مثال‌هایی از این تحقیقات شامل تحقیق س. کومار پاندا و د. راوی کومار [1] می‌باشد که به بررسی اثر فشار سیال بر شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش پرداخته‌اند و افزایش شکل‌پذیری را با استفاده از فشار محیطی سیال نسبت

به کشش عمیق متداول گزارش داده‌اند. قراخـانی [۷] و پاشـیره‌پـور [۸] در تحقیقـات خـود بـا اسـتفاده از شبیه‌سازی، شـکل‌دهـی ورق‌هـای ترکیبـی بـا سـنبه‌ی مربعـی شـکل را توسـط روش هیـدروفرمینگ مـورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقـات آن‌هـا مزایـای روش هیدروفرمینگ نسبت به کشش عمیـق متـداول از قبیـل یک‌نواختی کشش و امکان دسترسی به عمق کشش‌های بیشتر و کاهش جابه‌جایی خط جوش مشهود است.

این مطالعه با هـدف بررسـی اثـر فشـار سـیال در شکل‌دهی یک قطعه‌ی استوانه‌ای از ورق‌هـای ترکیبـی با در نظر گرفتن فشار شعاعی در شبیه‌سازی‌هـا، انجـام گرفته است. از آن‌جایی‌که محل خط جوش در قطعه‌ی نهایی و هم‌چنین توزیـع ضـخامت، عـلاوه بـرایـن‌کـه هندسه و کارایی محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهنـد، می‌توانند به عنوان نمادهایی در میزان شکل‌پذیری هـم مطرح گردند، لذا این دو عامل به عنوان شاخص مـورد بررسی قرار گرفته‌اند.

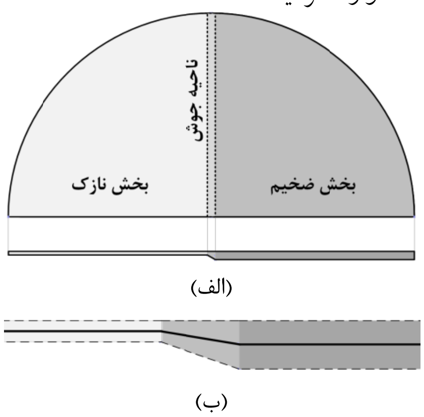


شکل ۱ هندسه و ابعاد قالب استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها

شبیه‌سازی

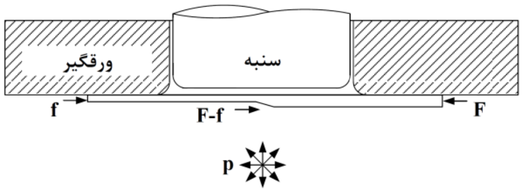
شبیه‌سازی ایـن فرآینـد در نـرم‌افـزار اجـزای محـدود آبـاکوس ۱-۶.۹ انجـام شـده و از روش حـل صـریح (Explicit) نرم‌افزار برای تحلیل فرآیند استفاده گردیده است. هندسه‌ی محصول نهایی به‌صـورت یـک فنجـان استوانه‌ای شکل به قطـر ۵۰ میلیمتـر و بـا ۱۰ میلیمتـر فلنج باقیمانده در نظـر گرفتـه شـده اسـت. بـه منظـور بررسی جابه‌جایی خـط جـوش و توزیـع ضـخامت در ناحیه‌ی فلـنج، قطعـه تـا انتهـا کشـیده نشـده و شـامل ناحیه‌ی فلنج می‌باشد. شکل (۱)، ابعـاد قالـب اسـتفاده شده در شبیه‌سازی‌ها را نمایش می‌دهد.

با توجه به تقارن موجـود، نیمـی از لـوح ترکیبـی دایره‌ای شکل، شبیه‌سازی شده است. ایـن نـیم‌دایـره از لوح ترکیبی به دو بخش با ضخامت‌های متفاوت و یک بخش به عنوان ناحیه‌ی خط جوش تقسـیم‌بنـدی شـده است (شکل ۲، الف). در مطالعات انجام‌شده [9,10] بـا بررسی میزان سختی و مشاهدات میکروسکوپی، عرض ناحیـه‌ی خـط جـوش در فرآینـد جوشـکاری لیـزر (CO_2 و Nd:YAG) برای جنس و ضخامت‌های مشـابه آن‌چه در این تحقیق بررسی می‌شود بین ۱ تا ۲ میلیمتر گـزارش شـده اسـت. بـا توجـه بـه ایـن اطلاعـات و مشاهدات تجربی، ناحیه‌ی خط جوش بـه عـرض ۱/۵ میلیمتر و به صورت شیب‌دار درنظر گرفته شد. بخـش «ب» شکل (۲)، الگوی استفاده شده جهت شبیه‌سـازی خط جوش را نمایش می‌دهد. بـرای شـبیه‌سـازی ایـن الگو با المان‌های پوسـته‌ای، هندسـه‌ی پوسـته‌ی میـانی لوح ترسیم و ضخامت هر بخش در دو طرف آن اعمال شد. ضخامت در ناحیه‌ی جوش لوح به عنوان تابعی از مختصات وارد گردید.



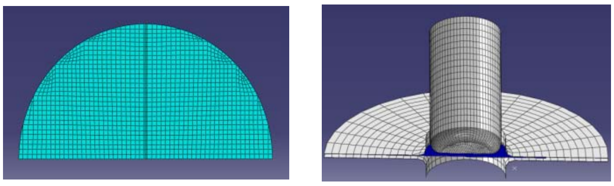
شکل ۲ الف) بخش‌های مختلف لوح ترکیبی؛ ب) الگوی شبیه‌سازی خط جوش

لوح ترکیبی به نحوی طراحی شد که اختلاف ضخامت دو بخش لوح در یک طرف بوده و یک سطح صاف در طرف دیگر وجود داشته باشد (شکل ۲، ب)؛ جوشکاری لوح با وجود سطح صاف در یک طرف ساده‌تر است؛ هم‌چنین می‌توان با قرار دادن سطح صاف لوح در زیر ورق‌گیر از نشت سیال به پشت ورق در کار تجربی جلوگیری کرد. از طرف دیگر، وجود نیروهای شعاعی متفاوت در دو لبه‌ی ورق می‌تواند سبب حرکت افقی لوح در راستای عمود بر خط جوش، قبل از نفوذ سنبه شود که قرار دادن تمامی اختلاف ضخامت در سطحی که فشار سیال بر آن اعمال می‌شود این مشکل را نیز برطرف می‌کند. شکل (۳) نحوه‌ی به تعادل رسیدن این نیروها را در الگوی انتخاب‌شده نمایش می‌دهد.



شکل ۳ الگوی قرارگیری لوح و نحوه‌ی به تعادل رسیدن نیروهای وارده به ورق از جانب سیال در راستای عمود بر خط جوش در صفحه‌ی افقی

ورق در شبیه‌سازی‌ها، به‌صورت جسم تغییرشکل‌پذیر و اجزای قالب به‌صورت جسم صلب مدل شده‌اند. با توجه به پایین‌تر بودن زمان محاسبات در المان‌های پوسته‌ای به نسبت المان‌های حجمی و هم‌چنین وجود قابلیت بررسی توزیع ضخامت به عنوان یک خروجی اولیه برای این نوع المان‌ها، در شبیه‌سازی ورق از المان‌های پوسته‌ای مربعی S4R استفاده شد. المان S4R از دسته المان‌های با کاربرد عمومی برای مسائل شکل‌دهی فلزات است. اندازه‌ی المان‌ها و هم‌چنین زمان فرآیند با استفاده از شبیه‌سازی‌های متعدد و بررسی تاریخچه‌ی انرژی‌ها و روند تغییرات تنش و کرنش در مراحل مختلف به ترتیب ۲ میلیمتر و ۰/۰۵ ثانیه انتخاب شدند. زمان فرآیند به نحوی انتخاب شد که شرط شبه‌استاتیک بودن در شبیه‌سازی‌ها برقرار باشد. در شکل (٤)، نمایی از مدل‌سازی و المان‌بندی ورق و اجزای قالب نشان داده شده است.



شکل ٤ الف) مدلی از اجزای قالب شبیه‌سازی شده
ب) مدلی از لوح ترکیبی شبیه‌سازی شده

در این بررسی از فولاد کربنی St12 استفاده شده است. این ماده همسان‌گرد فرض شده است. خواص مکانیکی ماده‌ی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها در جدول (۱) ارایه شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی فولاد St12 [۱۱]

کرنش پلاستیک	تنش (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۰	۲۹٤	۰/۳	۲۱۰
۰/۰۵	۳۲۸		
۰/۱	۳۵۳		
۰/۱۵	۳۷۲		
۰/۲	۳۸۹		
۰/۲۵	٤۰۰		
۰/۳	٤۱٦		

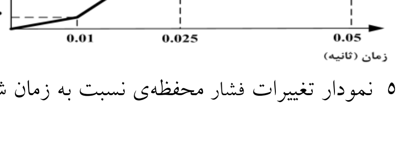
در بررسی تحلیلی و تجربی خواص بخش‌های مختلف ورق ترکیبی تولید شده توسط جوش لیزر، مقدار توان کارسختی در فلز جوش کمتر از فلزهای پایه و مقدار ضریب استحکام در آن بیشتر از این ضریب در فلزهای پایه گزارش شده است. در کل، سطح نمودار تنش-کرنش فلز جوش، بالاتر از فلزهای پایه ترسیم شده است [9] و این به معنی استحکام بالاتر در فلز جوش ورق ترکیبی است. در نتیجه دور از انتظار نیست که تفاوت زیادی در استحکام کششی کل

ورق ترکیبی با ورق‌های پایه (به علت وقوع پارگی در ورق نازک‌تر و نه در خط جوش) مشاهده نشود [12]. از طرف دیگر هرچند نسبت حجم مارتنزیت در جوش لیزر به علت بالا بودن نرخ سرد شدن زیاد است [10] و در نتیجه کرنش نهایی ناحیه‌ی جوش کمتر از فلزهای پایه است، ولی با توجه به عرض کم ناحیه‌ی جوش به نسبت قطر بلانک می‌توان این اثر را نادیده گرفت. در نتیجه در این تحقیق، با فرض استفاده از فرآیند جوشکاری لیزر با کیفیت بالا برای اتصال دو قسمت ورق ترکیبی و با نادیده گرفتن عیوب جوشکاری در خط جوش از خواص متفاوت ناحیه‌ی جوش صرف‌نظر شده است.

با توجه به تأثیرپذیری نمودار حد شکل‌دادن (Forming Limit Diagram (FLD)) از فشار هیدروستاتیک [13]، برای پیش‌بینی شکست در شبیه‌سازی‌های انجام شده، بیشینه‌ی نازک‌شدگی متناظر با شکست بر اساس نمودار حد شکل‌دادن بدون وجود فشار هیدروستاتیک، از شبیه‌سازی‌ها به‌دست آمده و برای فشارهای بالای سیال به‌کار برده شده است. این مقدار برابر با ۳۰٪ نازک‌شدگی است.

اصطکاک برای جنس ورق و قالب مورد استفاده در کمترین مقدار (روانکاری کامل) ۰/۰۲۹ و در بیشترین مقدار (تماس خشک) ۰/۴۲ پیشنهاد شده است [14]. با توجه به اطلاعات شبیه‌سازی‌های صحت‌سنجی شده‌ی مشابه [۱۱]، در این مطالعه ضریب اصطکاک در سطوح تماس ورق با ورق‌گیر و قالب ۰/۰۵ و در سطح تماس ورق با سنبه ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

تأثیر فشار سیال در فرآیند توسط اعمال فشار با توزیع یکنواخت در سطح ورق شبیه‌سازی شده است. شکل (۵)، نمودار تغییرات فشار محفظه‌ی سیال در طول فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمودار تغییرات فشار محفظه‌ی نسبت به زمان شبیه‌سازی

مقدار فشار اولیه‌ی سیال با استفاده از روابط پیشنهادی موجود [15]، که بر اساس نیروی لازم برای جدا نشدن ورق از ورق‌گیر در تماس اولیه‌ی سنبه با ورق تبیین شده بود، ۵ مگاپاسکال درنظر گرفته شده است.

به سبب استفاده از نیروی ورق‌گیری نرم در این فرآیند، فشارسیال موجود در ناحیه‌ی فلنج موجب اعمال نیروی شعاعی به لبه‌ی ورق می‌گردد. بررسی‌های صورت گرفته [16] نشان می‌دهد که این نیروی شعاعی برای ورق‌های ساده، اثری مشابه اثر کاهش اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر دارد که با تعیین ضریب اصطکاک معادل بین ورق و ورق‌گیر، می‌توان از این اثر چشم‌پوشی کرد. با توجه به ضخامت‌های متفاوت ورق‌های ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق و در نتیجه نیروهای شعاعی متفاوتی که به دو بخش این ورق‌ها اعمال می‌گردد، بررسی اثر این نیروها مورد توجه قرار گرفت.

از آن‌جایی که امکان اعمال فشار به لبه‌ی المان‌های پوسته‌ای در نرم‌افزار مورد استفاده وجود ندارد، اثر فشارهای شعاعی به نیروهای گسترده‌ی خطی تبدیل شده و به عنوان نیروهای لبه‌ای در مدل‌سازی وارد گردیده است.

نیروهای ناشی از فشار شعاعی دو بخش:

$$F = pL(T+\Delta T) \quad (۱)$$

$$f = pL(t+\Delta t) \quad (۲)$$

که p فشار سیال درون محفظه در هر لحظه، L طول لبه‌ی هر بخش از ورق، F و f به ترتیب نیروهای شعاعی وارد بر بخش ضخیم‌تر و نازک‌تر و T و t به ترتیب ضخامت‌های بیشتر و کمتر ورق ترکیبی هستند؛ ΔT و Δt تغییرات ضخامت بخش‌های ضخیم‌تر و نازک‌تر در طول فرآیند نسبت به ضخامت‌های اولیه‌ی همان بخش هستند. با فرض برابر بودن تغییرات ضخامت دو بخش ورق در ناحیه‌ی فلنج ($\Delta T=\Delta t$)، می‌توان با استفاده از ضریب اصطکاک معادل از اثر

$pL\Delta T$ و $pL\Delta T$ چشم پوشی کرد، درنتیجه با تعریف $Q = pT$ و $q = pt$ خواهیم داشت:

$$F = QL \quad (۳)$$

$$F = qL \quad (٤)$$

که Q و q در نرم‌افزار مورد استفاده، به لبه‌ی بخش مربوط اعمال شدند.

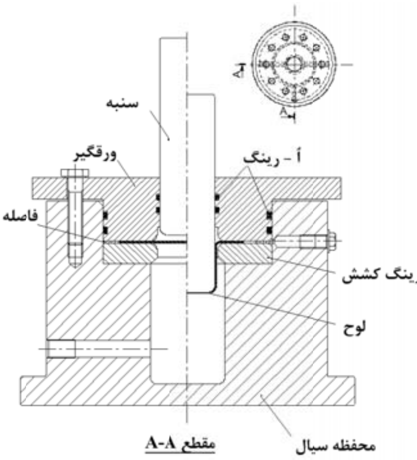
آزمایش‌های تجربی

ارزیابی شبیه‌سازی‌ها و اطمینان از درستی نتایج حاصل از آن‌ها نیازمند انجام بررسی‌های تجربی و به‌دست‌آوردن داده‌های تجربی برای مقایسه با نتایج عددی است. با توجه به وجود محدودیت ضخامت ورق در دستگاه جوش لیزر استفاده شده، در آزمایش‌های تجربی از ورق‌هایی با ضخامت کمتر استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی نتایج، شبیه‌سازی‌هایی با ابعاد قالب موجود و لوح‌های استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و با خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش تک محوره انجام شدند. آزمایش‌های تجربی عمدتا برای بررسی جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت محصول و با هدف مقایسه با نتایج شبیه‌سازی‌ها انجام گردیدند.

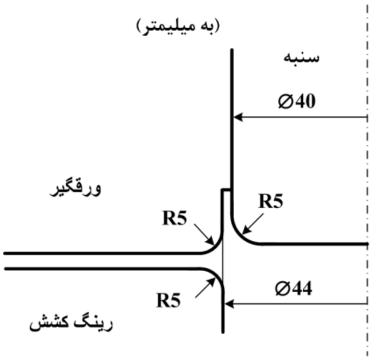
آزمایش‌ها با کمک یک دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن انجام شدند. سیال مورد استفاده روغن بود و از مدار کنترل هیدرولیکی برای کنترل فشار سیال در حین فرآیند استفاده شد.

اجزای اصلی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی شامل سنبه، رینگ کشش، محفظه‌ی سیال و ورق‌گیر می‌باشند. مشخصات این قالب که جهت کشش قطعات استوانه‌ای طراحی شده در شکل (٦) نشان داده شده است [۱۷].

برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی خط جوش، لازم است در هنگام شکل‌دهی، سنبه درست در وسط لوح فرود آید، بنابراین قطعاتی تحت عنوان فیکسچر– فاصله‌انداز (شکل ۷) طراحی و توسط برش لیزر ساخته شدند. فیکسچر– فاصله‌اندازها داخل قالب و بین ورق‌گیر و رینگ کشش قرار داده شد؛ و به وسیله‌ی سطح خارجی شاخک‌ها، درون حفره‌ی قالب تثبیت می‌شدند. این قطعات با قطر داخلی متفاوت (برای نسبت‌های کشش مختلف) ساخته شده است و توسط سطوح داخلی سه شاخک، لوح‌های دایره‌ای را موقعیت‌دهی می‌کردند.



(الف)



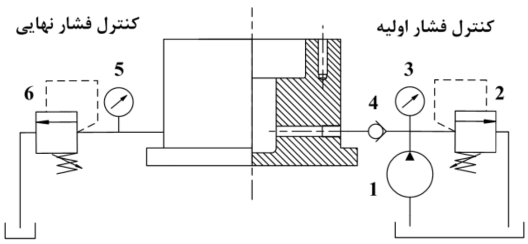
(ب)

شکل ٦ مشخصات قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی: الف) اجزای قالب [۱۷] ب) ابعاد قالب



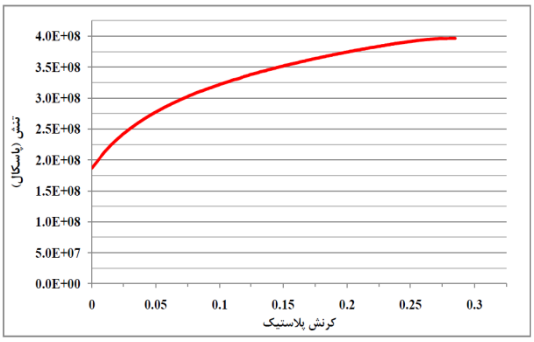
شکل ۷ فیکسچر– فاصله‌اندازهای ساخته شده برای نسبت‌های کشش مختلف

برای کنترل فشار روغن در مراحل مختلف فرآیند، از یک مدار کنترل هیدرولیکی مطابق شکل (۸) استفاده شده است. در مرحله‌ی پیش‌بالجینگ روغن به کمک پمپ ۱ به محفظه وارد می‌شود. فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد و ورق به سمت سنبه که در موقعیتی بالاتر از سطح اولیه ورق ثابت است، بالج می‌شود. فشار در این مرحله با شیر کنترل فشار ۲ تنظیم می‌گردد. در مرحله‌ی شکل‌گیری ورق به کمک سنبه، با حرکت سنبه به داخل محفظه، فشار روغن به‌شدت افزایش می‌یابد. شیر یک‌طرفه، ٤ مانع از برگشت روغن و تخلیه‌ی آن از طریق واحد پیش بالجینگ می‌شود. حداکثر فشار سیال داخل محفظه در حین فرآیند با استفاده از شیر کنترل فشار نهایی ٦ تنظیم می‌گردد. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می‌یابد.



شکل ۸ مدار هیدرولیکی کنترل فشار محفظه‌ی سیال؛ ۱: پمپ هیدرولیک؛ ۲: شیر کنترل فشار پیش‌بالجینگ؛ ۳: فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار پیش‌بالجینگ؛ ٤: شیر یک‌طرفه؛ ۵: فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار نهایی؛ ٦: شیر کنترل فشار نهایی محفظه

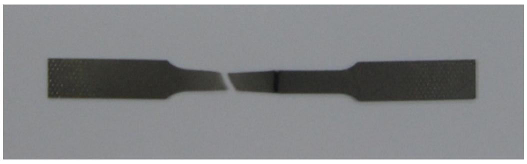
ورق‌های فولاد کم‌کربن با ضخامت‌های ۰/۵۱۵ و ۰/۷۰۵ میلیمتر جهت انجام آزمایش‌های کشش عمیق هیدرومکانیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی برای ارزیابی درستی نتایج ارایه شده نیازمند استفاده از خواص ورق‌ها در شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. به این منظور از نتایج آزمون کشش تک محوری برای تعیین و محاسبه‌ی ویژگی‌های مورد نیاز ورق‌ها استفاده شده است. با استخراج منحنی تنش-کرنش مهندسی ورق از آزمون کشش تک محوری و تبدیل آن به منحنی تنش-کرنش حقیقی، تنش تسلیم ورق‌های تهیه شده ۱۸۷ مگاپاسکال و مدول یانگ آن‌ها ۱۷۰ گیگاپاسکال به‌دست آمد. در شکل (۹) منحنی تنش- کرنش پلاستیک ورق‌ها ارایه شده است.



شکل ۹ منحنی تنش- کرنش پلاستیک به‌دست آمده از آزمون کشش تک‌محوره

لوح‌های ترکیبی استفاده شده در آزمایش‌های تجربی در قطرهای مختلف (برای نسبت‌های کشش مختلف) از دو نیم‌دایره با ضخامت‌های ۰/۵۱۵ و ۰/۷۰۵ میلیمتری تشکیل شده بودند. از آن‌جایی که کیفیت برش ورق‌ها، فاصله‌ی هوایی در محل جوش و در نتیجه کیفیت نهایی جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و هم‌چنین دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی خط جوش به میزان دقت ابعادی و تقارن در لوح اولیه بستگی دارد، برای برش نیم‌دایره‌ها از فرآیند برش سیم(Wire-cut) استفاده شد.

برای اتصال دو بخش لوح ترکیبی از دستگاه جوش لیزر Nd:YAG با توان ٦٠ وات استفاده شد. برای ارزیابی میزان استحکام جوش، نمونه‌هایی به شکل استاندارد آزمون کشش تک محوره با دو ضخامت ۰/۵۱۵ و ۰/۷۰۵ و با وجود جوش عرضی تهیه شد و تحت کشش قرار گرفت. وقوع پارگی در بخش نازک‌تر قطعات (شکل ۱۰)، وجود استحکام لازم در ناحیه‌ی جوش را تایید کرد.



شکل ۱۰ وقوع پارگی در بخش نازک‌تر نمونه‌های آزمون کشش تک محوره با جوش عرضی

آزمایش‌های کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی با هدف بررسی میزان جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت محصول برای چند نسبت کشش و در فشارهای نهایی مختلف انجام شدند. پارامترهای این آزمایش‌ها بر پایه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر اساس مشخصات مواد و قالب آزمایش‌ها انتخاب شدند. شکل‌های (۱۲و۱۱) به ترتیب مجموعه تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و انواع پارگی در قطعات در حین شکل‌دهی هیدرومکانیکی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱ تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌های تجربی



(الف) (ب) (ج)

شکل ۱۲ انواع پارگی در شکل‌دهی هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی: الف) شعاع سر سنبه در بخش نازک‌تر لوح؛ ب) شعاع رینگ کشش در بخش نازک‌تر لوح؛ ج) ناحیه‌ی جوش



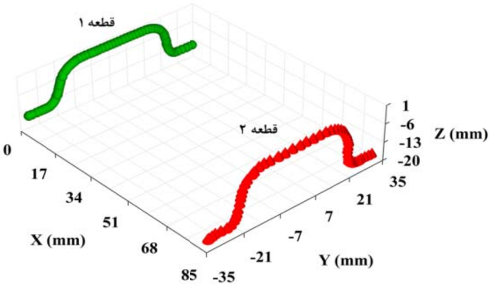
شکل ۱۳ بررسی مسیر خط جوش توسط دستگاه CMM

برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خط جوش نمونه‌ها از دستگاه اندازه‌گیری CMM استفاده شد. در این روش پس از مشخص شدن موقعیت خط جوش در فضا توسط ابر نقاط، مقدار جابه‌جایی خط جوش از موقعیت اولیه در جهت عمود بر خط جوش (در صفحه‌ی لوح اولیه) محاسبه و با نتایج شبیه‌سازی‌ها مقایسه شد. برای بررسی توزیع ضخامت محصولات در طول خط تقارن آن‌ها، قطعات توسط فرآیند برش سیم از روی خط تقارن بریده شدند و میزان ضخامت در چند بخش مختلف آن‌ها با استفاده از میکرومتر سر مخروطی (با تماس تقریبا نقطه‌ای) اندازه‌گیری شد.

صحت سنجی نتایج

در این بخش درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی و مقایسه‌ی جابه‌جایی خط جوش در طول خط جوش و توزیع ضخامت در طول خط تقارن ارزیابی می‌شود. شبیه‌سازی‌های این بخش با ابعاد قالب و لوح‌های استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و با خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش تک محوره انجام

شده‌اند. فشار اولیه‌ی محفظه با توجه به ابعاد لوح استفاده شده در آزمایش‌ها، ۳ مگاپاسکال انتخاب شده است، سایر شرایط شبیه‌سازی‌ها مشابه شرایط توضیح داده شده در بخش شبیه‌سازی‌ها است. برای ارزیابی میزان درستی نتایج شبیه‌سازی‌ها، دو قطعه که درنسبت‌های کشش و فشارهای نهایی متفاوت، شکل داده شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ١٤ مختصات خطوط جوش دو قطعه‌ی حاصل از آزمایش‌های تجربی به‌دست آمده از CMM

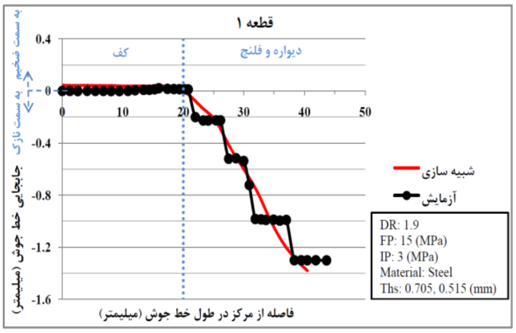
قطعه‌ی ۱ (شکل ۱۵) در نسبت کشش ۱/۹ و با فشار نهایی ۱۵ مگاپاسکال تولید شده است. در شکل ١٦ مقادیر جابه‌جایی خط جوش قطعه‌ی ۱ در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مقایسه گردیده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت بسیار خوبی در نتایج وجود دارد. پله‌ای بودن نتایج تجربی به علت روش اندازه‌گیری اپراتور دستگاه CMM است.

در شکل (۱۷) توزیع ضخامت در شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری ضخامت قطعه‌ی ۱ مقایسه شده است که مطابقت بسیار خوبی مشاهده می‌شود.

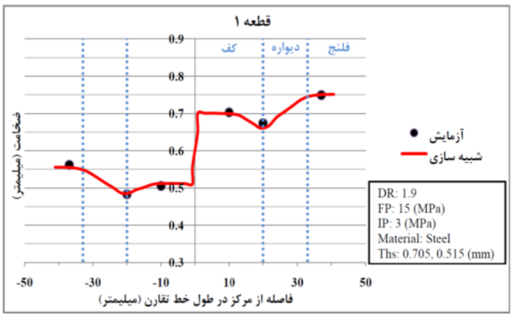
قطعه‌ی ۲ (شکل ۱۸) در شرایطی متفاوت نسبت به قطعه‌ی ۱ و در نسبت کشش ۲ و با فشار نهایی ۲۰ مگاپاسکال تولید شده است. در شکل (۱۹) مقادیر جابه‌جایی خط جوش این قطعه در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مقایسه گردیده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی در نتایج وجود دارد. از آن‌جایی که محورهای مختصات دستگاه اندازه‌گیری بر راستای خط جوش قطعه منطبق نبوده‌اند، نتایج پس از اندازه‌گیری در نرم‌افزار مناسب دوران داده شدند که اریب شدن پله‌های مقادیر تجربی جابه‌جایی خط جوش را نتیجه داده است.



شکل ١٥ قطعه‌ی ١



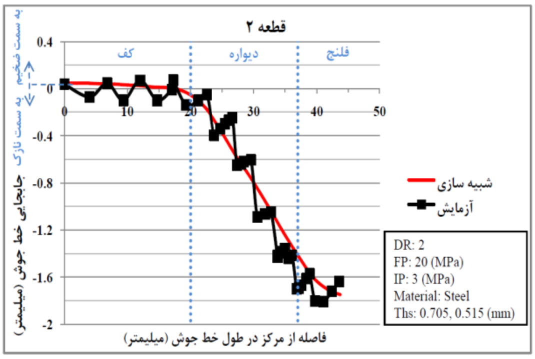
شکل ١٦ مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی جابه‌جایی خط جوش قطعه‌ی ١



شکل ١٧ مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی توزیع ضخامت قطعه‌ی ١

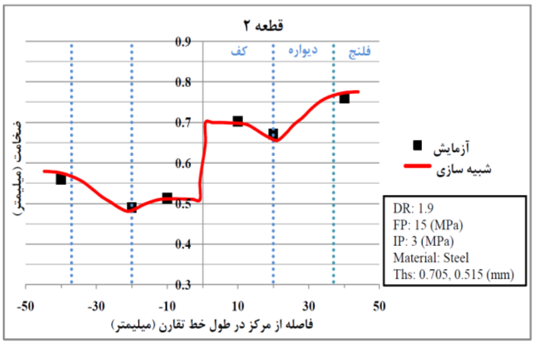


شکل ١٨ قطعه‌ی ٢



شکل ۱۹ مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی جابه‌جایی خط جوش قطعه‌ی ۲

در شکل (۲۰) توزیع ضخامت در شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری ضخامت قطعه‌ی۲ مقایسه شده است که مطابقت خوبی مشاهده می‌شود.

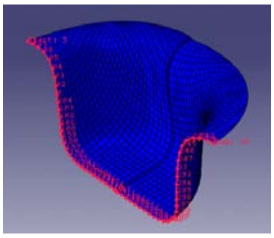


شکل ۲۰ مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی توزیع ضخامت قطعه‌ی ۲

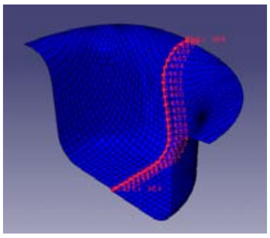
اختلاف موجود در نتایج بررسی ضخامت و جابه‌جایی خط جوش محصولات در شبیه‌سازی‌ها و نتایج تجربی می‌تواند به علت ضخامت ناهمگون نقاط مختلف ورق‌های اولیه و ناهمسان‌گردی آن‌ها و هم‌چنین وجود اختلاف در شرایط اصطکاکی و روند تغییر فشار سیال در شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی باشد. هم‌چنین وجود مقدار کمی نشتی در آزمایش‌ها، کنترل بر توزیع فشار سیال را درناحیه‌ی فلنج محصول در طول فرآیند دشوار ساخته است که می‌تواند بر نتایج نهایی تأثیر گذار بوده باشد.

نتایج و بحث

پس از تأیید صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش پیشین، در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارایه و بررسی می‌گردند. با تغییر در مقادیر فشار نهایی و فشار اولیه‌ی سیال در شبیه‌سازی‌ها، مقدار و چگونگی اثرگذاری این عوامل بر توزیع ضخامت و یا بیشینه‌ی نازک‌شدگی و هم‌چنین جابه‌جایی خط جوش در محصول نهایی بررسی شده‌اند.



(الف)



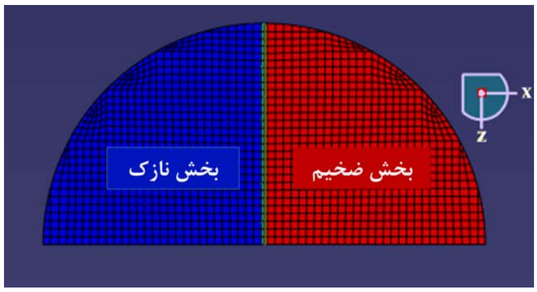
(ب)

شکل ۲۱ الف) مسیر اندازه‌گیری توزیع ضخامت (خط تقارن)، ب) مسیر اندازه‌گیری جابه‌جایی خط جوش (خط جوش)

مقدار بیشینه‌ی نازک‌شدگی در کل محصول و به صورت درصد بیان شده است. در نمودارهای توزیع ضخامت، ضخامت در طول خط تقارن محصول گزارش شده است (شکل ۲۱، الف). نمودارهای جابه‌جایی خط جوش، میزان حرکت هر گره از خط جوش در راستای عمود بر خط جوش اولیه را نمایش می‌دهند (شکل ۲۱، ب). همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، خط جوش در راستای محور Z قرار دارد، در نتیجه با توجه به موقعیت لوح، جابه‌جایی هر گره از خط جوش در جهت مثبت و منفی محور

X، به ترتیب به عنوان جابه‌جایی به سمت بخش ضخیم و بخش نازک لوح ترکیبی گزارش شده است.

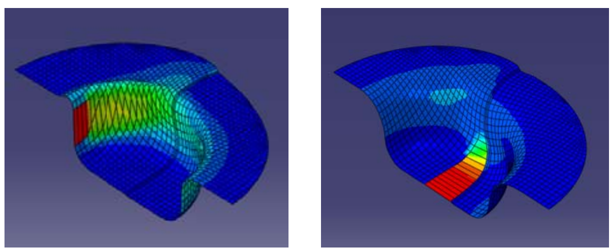
اثر فشار نهایی سیال. در این مرحله با تغییر فشار نهایی برای لوح ترکیبی ۱/۵ به ۰/۷۵ میلیمتری، اثر این عامل بر میزان جابه‌جایی خط جوش و هم‌چنین توزیع ضخامت بررسی شده است.



شکل ۲۲ موقعیت لوح ترکیبی نسبت به محورهای مختصات

جدول ۲ خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌ها برای لوح ترکیبی ۱/۵ به ۰/۷۵ میلیمتری

محل	بیشینه‌ی نازک‌شدگی (٪) یا گزارش شکست	فشار نهایی (مگاپاسکال)	فشار اولیه (مگاپاسکال)
کف	شکست	۱۵	۵
کف	۱۹/۵۸	۲۰	۵
دیواره	۱۲/۷۱	۳۰	۵
دیواره	۱۸/۳۹	۴۰	۵
دیواره	۲۸/۹۸	۵۰	۵
دیواره	شکست	۵۵	۵

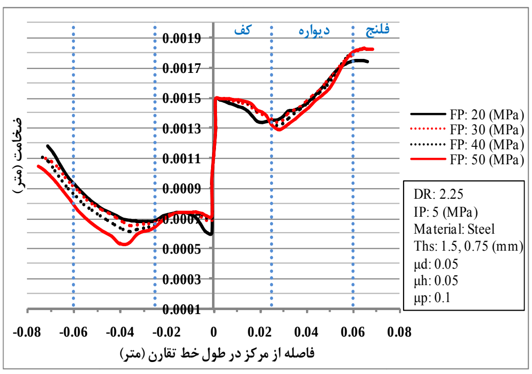


(ب)   (الف)

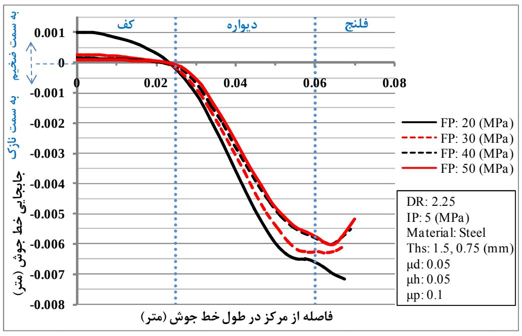
شکل ۲۳ الف) پارگی در کف قطعه و در نزدیکی خط جوش در فشار نهایی ۱۵ مگاپاسکال؛ ب) پارگی در دیواره‌ی قطعه در فشار نهایی ۵۵ مگاپاسکال

جدول (۲)، خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده را نشان می‌دهد. در فشار نهایی ۱۵ مگاپاسکال و کمتر، جابه‌جایی زیاد خط جوش در کف قطعه و کرنش بالای ناشی از آن موجب پارگی در نزدیکی خط جوش (شکل ۲۳، الف) (در اثر تمرکز تنش) می‌شود. در نتیجه تولید این قطعه با فرآیند کشش عمیق سنتی امکان‌پذیر نیست. با افزایش فشار نهایی و با فشرده شدن بیشتر ورق به زیر سنبه و در نتیجه کاهش جابه‌جایی خط جوش در کف فنجان، نازک‌شدگی این منطقه کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش فشار نهایی و به علت افزایش نیروی ورق‌گیری و کاهش حرکت ورق به داخل حفره‌ی قالب، بیشینه‌ی نازک‌شدگی در دیواره‌ی قطعه ایجاد می‌شود؛ و در نهایت در فشار نهایی ۵۵ مگاپاسکال و بیشتر، منجر به پارگی (شکل ۲۳، ب) می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک مقدار بهینه در فشار نهایی برای کمترین بیشینه‌ی نازک‌شدگی وجود دارد.

همان‌گونه که در شکل (۲۴) دیده می‌شود، بیشینه‌ی نازک‌شدگی در بخش ضخیم‌تر در نزدیکی شعاع سنبه اتفاق افتاده، در حالی‌که در بخش نازک‌تر در دیواره رخ داده است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که با افزایش فشار، بیشینه‌ی نازک‌شدگی در هر دو بخش، از شعاع سنبه به سمت دیواره حرکت کرده است.



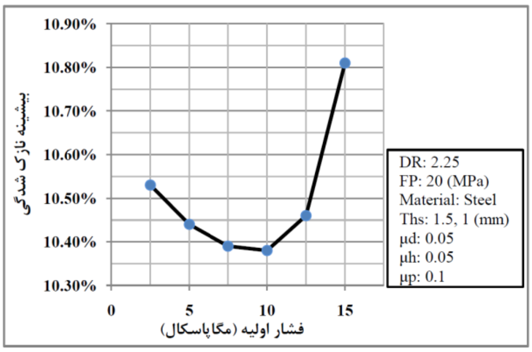
شکل ۲۴ اثر فشار نهایی سیال بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح



شکل ۲۵ اثر فشار نهایی سیال بر جابه‌جایی خط جوش در طول خط جوش لوح

شکل (۲۵)، منحنی‌های جابه‌جایی خط جوش در فشارهای نهایی مختلف را برای لوح ترکیبی ۱/۵ به ۰/۷۵ میلیمتری نشان می‌دهد. با افزایش فشار نهایی، در اثر فشرده شدن ورق به زیر و دیواره‌ی سنبه و همچنین به ورق‌گیر حرکت دو بخش ورق محدودتر شد و درنتیجه جابه‌جایی خط جوش کاهش یافت. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فشار نهایی از ۲۰ به ۳۰ مگاپاسکال تغییر زیادی در میزان جابه‌جایی خط جوش رخ داده است، درحالی‌که این تغییر از فشار نهایی ۳۰ به ۴۰ و از ۴۰ به ۵۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که کاهش جابه‌جایی خط جوش با افزایش فشار نهایی امکان‌پذیر ولی محدود است.

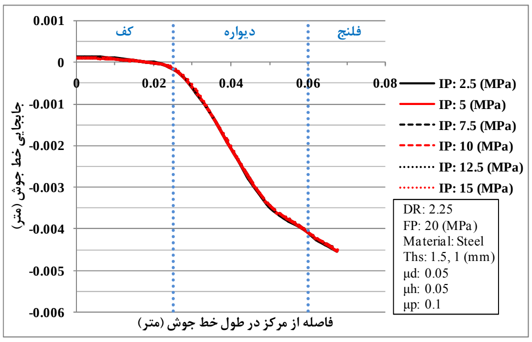
اثر فشار اولیه‌ی سیال. در این بخش با تغییر فشار اولیه (پیش‌بالج) و ثابت نگه‌داشتن فشار نهایی سیال (۲۰ مگاپاسکال)، اثر این عامل بر فرآیند بررسی شده است.



شکل ۲٦ اثر فشار اولیه بر بیشینه‌ی نازک‌شدگی

از آن‌جایی‌که اثر تغییر فشار اولیه‌ی سیال بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن قطعه ناچیز است، مقدار بیشینه‌ی نازک‌شدگی در کل محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج (شکل ٢٦) نشان می‌دهد که یک مقدار بهینه برای فشار اولیه بر اساس بیشینه‌ی نازک‌شدگی وجود دارد. با افزایش فشار اولیه از ۲/۵ تا ۱۰ مگاپاسکال، علاوه بر کشش معکوس و ورود ورق بیشتر به زیر سنبه به سبب بالج ورق، شکل‌گیری کف و گوشه‌ی سنبه در همان مراحل اولیه، باعث کاهش بیشینه‌ی نازک‌شدگی می‌شود؛ از طرف دیگر با افزایش فشار اولیه از ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال، افزایش نیروی ورق‌گیری در طول فرآیند، جریان ورق به داخل حفره را دشوارتر ساخته و افزایش بیشینه‌ی نازک‌شدگی را در پی دارد.

همان‌طور که در شکل (۲۷) مشاهده می‌شود، تغییر فشار اولیه در محدوده‌ی بررسی شده، تأثیر چندانی بر جابه‌جایی خط جوش ندارد.



شکل ۲۷ اثر فشار اولیه‌ی سیال بر جابه‌جایی خط جوش در طول خط جوش لوح

نتیجه‌گیری

در این مطالعه فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی با اعمال فشار شعاعی شبیه‌سازی گردید و با استفاده از یک قالب آزمایشی برخی از نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شدند. انطباق خوبی در نتایج عددی و تجربی مشاهده گردید، به

گونه‌ای که می‌توان از نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های مشابه برای شناخت بهتر فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی و کمک به طراحی و تولید کارآمدتر محصولات مورد نیاز از لوح‌های ترکیبی استفاده کرد. در نهایت با بررسی توزیع ضخامت و جابه‌جایی خط جوش به عنوان دو عامل مهم در شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی، اثر فشار اولیه و فشار نهایی سیال بر این دو عامل بررسی شد و نتایج زیر مشاهده گردید:

۱- اعمال فشار شعاعی، سبب کاهش کلی نازک‌شدگی شد و کاهش شدید جابه‌جایی خط جوش در کف فنجان و افزایش در دیواره و فلنج را به همراه داشت.

۲- افزایش فشار نهایی سیال محفظه، کاهش نازک‌شدگی درکف فنجان و در نزدیکی خط جوش، و افزایش نازک‌شدگی در دیواره را به همراه داشت؛ هم‌چنین با افزایش فشار نهایی محل بیشینه‌ی نازک‌شدگی به سمت لبه‌ی فنجان حرکت کرد. افزایش فشار نهایی، کاهش جابه‌جایی خط جوش را نیز به همراه داشت.

۳- برای فشار اولیه بر اساس بیشینه‌ی نازک‌شدگی، یک مقدار بهینه وجود داشت. تغییر فشار اولیه در رنج بررسی شده، تأثیر چندانی بر جابه‌جایی خط جوش نداشت.

سپاسگزاری

از همکاری‌های جناب دکتر محمد حبیبی پارسا و دانشگاه تهران در انجام آزمایش‌های عملی تشکر و قدردانی می‌شود.

فهرست علایم

نسبت کشش	DR
فشار نهایی سیال محفظه	FP
فشار اولیه‌ی سیال محفظه	IP
ضخامت‌های دو بخش لوح ترکیبی	Ths
ضریب اصطکاک رینگ کشش- ورق	µd
ضریب اصطکاک ورق‌گیر- ورق	µh
ضریب اصطکاک سنبه- ورق	µp

مراجع

1. Kumar panda, S., Ravi Kumar, D., "Improvement in formability of tailor welded blanks by application of counter pressure in biaxial stretch forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, pp. 70 -79, (2008).
2. Ahmetoglu, M.A., Brouwers, D., Taupin, L.S., Kinzel, G.L. and Altan, T., "Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 53, pp. 684-694, (1995).
3. Kinsey, B., Liu, Z. and Cao, J., "A novel forming technology for tailor-welded blanks", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, pp.145-153, (2000).
4. Jiang, H.M., Li, S.H., Wu, H. and Chen, X.P, "Numerical simulation and experimental verification in the use of tailor-welded blanks in the multi-stage stamping process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 316-320, (2004).
5. Chena, W., Lin, G.S. and Hu, S.J., "A comparison study on the effectiveness of stepped binder and

weld line clamping pins on formability improvement for tailor-welded blanks", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, pp. 204-210, (2008).

6. Padmanabhan, R., Oliveira, M.C. and Menezes, L.F.," Deep drawing of aluminium–steel tailor-welded blanks", *Journal of Materials and Design*, Vol. 29, pp. 154–160, (2008).

۷. قراخانی، مهدی، "بررسی عمق کشش ورق‌های ترکیبی (TWB) در فرآیند هیدروفرمینگ"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، (۱۳۸۷).

۸. پاشیره‌پور، جمال، "بررسی جابه‌جایی خط جوش در شکل‌دهی ورق ترکیبی به روش هیدروفرمینگ"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، (۱۳۸۷).

9. Ghoo, B. Y., Keum, Y. T. and Kim, Y. S., "Evaluation of the mechanical properties of welded metal in tailored steel sheet welded by CO2 laser", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 692-698, (2001).

10. Meinders, T., van den Berg, A. and Huetink, J., "Deep drawing simulations of Tailored Blanks and experimental verification", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, pp. 65-73, (2000).

۱۱. رحمنی، فرزاد، "بررسی عددی و تجربی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ برای قطعات غیرگرد"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۸).

12. Chan, S. M., Chan, L. C. and Lee, T. C., "Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams", *Journal of Materials Processing Technology*,Vol. 132, pp. 95-101, (2003).

13. Assempour, A., Khakpour Nejadkhaki, H., Hashemi, R., "Forming limit diagrams with the existence of through-thickness normal stress", *Computational Materials Science*, Vol. 48, pp. 504-508, (2010).

14. www.Engineer’s handbook.com, (May 2010).

15. Shim, H. and Yang, D. Y., "A simple method to determine pressure curve for sheet hydro-forming and experimental verification", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 134-142, (2005).

16. Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K. B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 150–161, (2005).

۱۷. دیلمی عضدی، حامد، "بررسی تئوری و تجربی اثر شرایط کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی"، رساله‌ی دکتری مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸٦).